

可変容量半導体ダイオードに関する研究

著者	清水 東
号	47
発行年	1961
URL	http://hdl.handle.net/10097/8783

氏 名	し 清 水 東 ^{あずま}
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭和 37 年 3 月 23 日
学位授与の根拠法則	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気及通信工学専攻
学 位 論 文 題 目	可変容量半導体ダイオードに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 和 田 正 信
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 和 田 正 信
	東北大学教授 小 池 勇 二 郎
	東北大学教授 高 橋 正
	東北大学助教授 西 沢 潤 一

論文内容要旨

第 1 章 概 要

最近より多くの情報量を長距離伝送するという要求から広帯域の低雑音の増幅器が必要となって来た。更に小型化の要求も加わって来た。これらの要求に対する半導体からの寄与は、元来の半導体ダイオード、トランジスタの他に、可変容量半導体ダイオードによるパラメトリック増幅器、エサキダイオード増巾器発振器等があげられる。

本論文は可変容量半導体ダイオードの研究をまとめたものであり、パラメトリック増幅器用可変容量ダイオードに重点をおいて論じている。第 2 章でパラメトリック増巾器の原理と歴史を述べ、他の用途についても述べる。第 3 章はパラメトリック増巾器の利得帯域巾積と雑音指数の考察から、可変容量ダイオードの Figure-of-Merit を遮断周波数 f_c と容量変化率 γ の積で示すのが良いことを提案する。又可変容量ダイオードに要求されるその他の事項についても記述する。

第 4 章では半導体の可変容量ダイオードを、一般的な不純物分布に対し解析して、第 3 章に示した可変容量ダイオードの Figure-of-Merit、遮断周波数、容量変化率等を算出する。 $p-n$ の境界より遠ざかるに従い不純物濃度が減るような分布が容量の変化が大きいがことが推論される。

第 5 章では前章の推論より容易に実現出来る分布として濃度が原点からの距離に関して指数関数的に減少する不純物分布を仮定し、容量と電圧の関係を導き、容量変化率を求めている。第 6 章では第 5 章で仮定した不純物分布は合金拡散法で容易に実現出来ることを示し、このダイオードの設計方法及び製作方法の概説を行う。第 7 章は実験結果を示し、その検討を行う。第 8 章は結論である。

第 7 章の電圧容量特性の実験結果は第 6 章の設計値が第 5 章の理論計算から得られる特性と良好一致を示し、再現性も大である。特に注目すべきことは合金拡散法で電圧による容量の変化の非常に大きいダイオードが得られたことである。既に、接合容量が電圧の -3 乗にも比例し数ボルトの印加電圧により、容量が零バイアスの時の 1/100 にも減少するものが製作出来た。これは従来のダイオードに比し 10 倍程度の大きな容量変化である。

遮断周波数 30KMc、筆者の提案する Figure-of-Merit 5.5 KMc/V のものまで製作出来た。低い製作技術にもかかわらず他の種のダイオードと同程度の Figure-of-Merit を得ている。

第 2 章 可変容量半導体ダイオードの歴史、分類、用途、パラメトリック増巾器の簡単な原理.

2. 1 節は North が Au ボンド Ge ダイオードを使った周波数変換で中間周波に負性抵抗を発見して (1946 年) 以来の可変容量ダイオードの簡単な歴史を述べている。1958 年、Uenohara 等は可変容量半導体ダイオードによるマイクロ波の非常に低雑音のパラメトリック増幅に成功し、これは励振電力も小さく回路も割合簡単と云う利点もあって特に注目された。

この増巾器に適するダイオードの設計製作方法も種々提案され次の様なものがある。

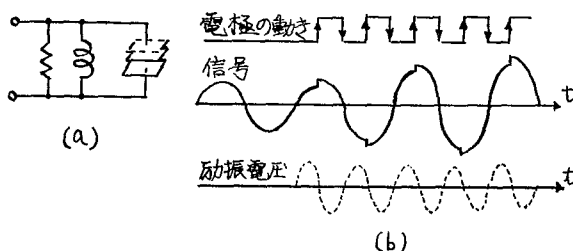
- (1) 点熔接型 $\left\{ \begin{array}{l} \text{金ボンド} \cdots \text{North} \\ \text{銀ボンド} \cdots \text{喜田等} \end{array} \right.$
- (2) 合金型 \cdots Giacoletto 等及び Mortenson
- (3) 拡散型 \cdots Bakanowsky 等
- (4) 超階段型 $\cdots \left\{ \begin{array}{l} \text{拡散法} \cdots \text{McMahon 等} \\ \text{合金拡散法} \quad \text{筆者} \end{array} \right.$

可変容量半導体ダイオードはバリコンの代りに用いて (1) 電子同調、(2) 電子制御フィルタ、

(3) 可変減衰器, (4) FM 発振器, (5) AFC等の用途がある. (6) パラメトリック増幅器 (アップコンバータを含む) (7) 低調波や高調波の発生器, (8) 検波器, (9) スイッチング素子, (10) 記憶素子としても用途がある.

2. 2節 パラメトリック増幅器の原理

第1図 (a) に示す様な同調回路を考える. この回路は信号の周波数に同調しているものとし,



第1図 パラメトリック増幅器の原理

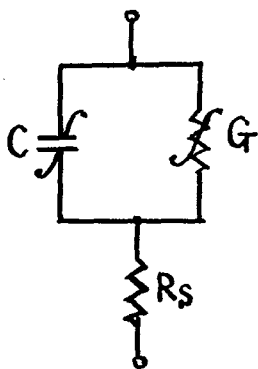
コンデンサの電極間の距離は自由に変えられると考える. コンデンサの電圧が正又は負の最大値になった時, 即ち電極の電荷が最大になった時電極間の距離を急激に大きくすると, 機械的仕事になされ, そのエネルギーは電極間の電界に蓄えられる. この時容量は急激に減少し, 電荷は急には変わらないから $V=Q/C$ の関係から端子電圧が上昇する. 次にコンデンサに加わる電圧が零となった時電極を近づける. この時は電極間には電界がないので仕事はなされない. 又電圧も変わらない. 電極の動きと信号電圧の関係を第1図 (b) に示す. 半導体ダイオードの障壁容量は加わる電圧により変化するのでこれを利用してコンデンサの電極を動かしたと同じ作用を得られる. 半導体ダイオードの容量を変えるのに使われる電圧は励振電圧と呼ばれ, 信号周波数の2倍の周波数でなければならない.

第3章 パラメトリック増幅用可変容量半導体ダイオードの必要条件及び

Figure-of-Merit

(3. 1) 遮断周波数, f_c

ダイオードの等価回路は第2図の様に示され, 逆方向バイアス時のダイオードの遮断周波数は次式で示せる.



$$f_c = \frac{1}{2\pi C_0 R_s} \dots\dots\dots (1)$$

ここに C_0 は動作バイアス点に於ける接合容量, R_s は直列抵抗である.

(3. 2) 容量の変化

(a) 容量が電圧の冪乗に比例するとして,

$$\eta = \frac{d(\log C)}{d(\log V)} \dots\dots\dots (2)$$

(b) 容量の変化率 γ ,

$$\gamma = \frac{(dC/dV)}{C} \dots\dots\dots (3)$$

(c) 容量が次式の様に变化するとして,

$$C = C_0 + C_3 \cos \omega_3 t \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta = C_3/C_0 \dots\dots\dots (5)$$

で定義される δ

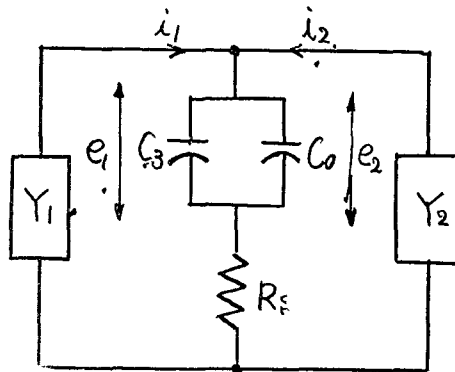
(d) 容量の最大変化比 κ

$$\kappa = C(\max)/C(\min) \dots\dots\dots (6)$$

本論文では主に (3), (5) 式を用いる。

(3. 3) パラメトリック増幅器の利得帯域幅積の考察より Figure-of-Merit の提案。

可変容量ダイオードを用いたパラメトリック増幅器の等価回路は第3図の如く示せる。中央の



第3図 パラメトリック増幅器の等価回路

C_0 , C_3 , R_s が可変容量ダイオードを示し, Y_1 と Y_2 はそれぞれ信号とアイドラ周波数に対する負荷アドミッタンスを示す。ダイオードの容量は (4) 式の様に変化するとする。ここに ω_3 は励振電圧の角周波数で, $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ なる関係を満し, ω_1 , ω_2 は信号とアイドラの角周波数である。 ω_1 , ω_2 に同調を取った時の取得の最大の利得帯域幅積は次式で示される。

$$F = \frac{1}{8\pi} \frac{C_3}{C_0} \sqrt{\omega_1 \times \omega_2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ω_1 と ω_2 が励振周波数 ω_3 の丁度 1/2 の時利得帯域幅積 F は最大となり, ダイオードの容量が効果的に変化するためには勿論励振の周波数は (1) 式の遮断周波数以下でなければならないから,

$$F \leq \frac{fc}{8} \times \frac{C_3}{C_0} = F_{\max} \quad \dots\dots\dots (8)$$

この F_{\max} を可変容量ダイオードの Figure-of-Merit とすることも出来るが, C_3/C_0 を $\{(dC/dV)/C\} \times v = \gamma \times v$ (但し v は励振電圧) でおきかえると,

$$F \leq F_{\max} = \frac{fc}{8} \frac{dC}{dV} \cdot \frac{1}{C} \times v = \frac{fc}{8} \cdot \gamma \cdot v = F_\gamma \cdot v \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{但し,} \quad F_\gamma = fc/8 \times \gamma \quad \dots\dots\dots (10)$$

即ち取り得る最大の利得帯域幅積は (10) 式の値 F_γ と励振電圧 v の積になる。筆者はこの F_γ の値を単位の励振電圧に対して得られる最大の利得帯域幅積を示すと云う意味で, 可変容量ダイオードの Figure-of-Merit として提案する。バイアスによりこの値は変るが最大になる点にバイアスすることによりバイアスの最適値を得る。

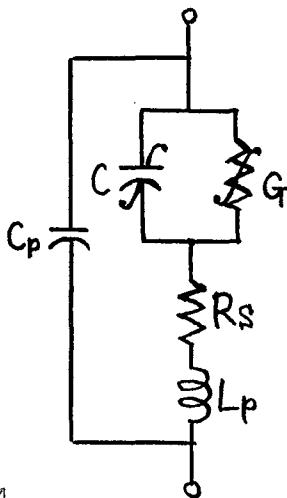
(3. 4) 雑音指数

可変容量パラメトリック増幅器の雑音指数は次の励振条件を満すと極小値となる。

$$\frac{C_3}{C_0} = 2 \sqrt{\frac{G_2}{\omega_1 C_0}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

又ダイオードの遮断周波数 (即ち Q) が高ければ高いほど雑音指数は小さくなる。このことから遮断周波数 fc と容量変化率 γ の大きいことが要求される。

(3. 5) 動作点の容量 C_0



第4図

容器に入れたダイオードの等価回路

この値は回路構成上使用周波数に同調が可能でなければならない。

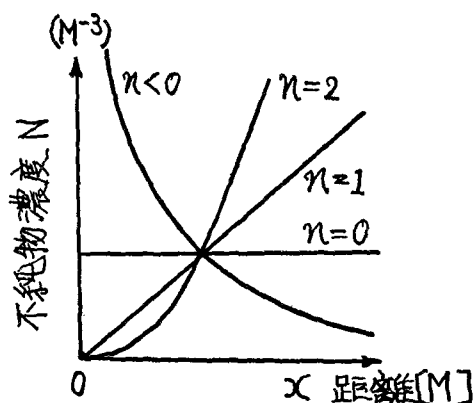
ダイオードを容器に入れた場合の等価回路は第4図の様になり、リード線のインダクタンス L_p 、浮遊容量 C_p が入っても可変容量として使えるためには次式が成立していなければならない。

$$\omega L_p \ll \frac{1}{\omega C_0} \ll \frac{1}{\omega C_p} \quad \dots\dots\dots (12)$$

第4章 一般的な不純物分布に対する容量、遮断周波数、容量変化率、 Figure-of-Merit の式の導出。

解析の簡単なためと見通しの良い理論式を得るため次の仮定をおく、

- (1) 平面接合であり、一次元的に不純物濃度が変化している。
- (2) 接合の一方は非常に不純物濃度が高くこちら側には殆んど空乏層が伸びず電圧もこちらにはかからないとする。



第5図 不純物分布

- (3) 他の側の不純物分布は第5図に示す様で次式で示せるとする。

$$N(x) = N_0 x^n [\text{M}^{-3}] \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに n は $-1, -2$ 以外の任意の定数, x は $p-n$ の境界からの距離 [M], $N(x)$ は x 点の不純物濃度 [M^{-3}], N_0 は任意定数。

- (13) 式をポアソンの方程式に代入して、

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{q}{K} N(x) = -\frac{q}{K} N_0 x^n \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここに q は電子の電荷 $= 1.6 \times 10^{-19} [\text{C}]$ K は材料の誘電率 [F/M],

空乏層の厚さを $d [\text{M}]$ とし $E_d = -\left(\frac{dV}{dx}\right)_{x=d} = 0, V_{x=0} = 0, V_{x=d} = \phi_0 + V$, (但し, ϕ_0 は拡散電位差, V : 印加電圧, 逆方向を正と取る) なる境界条件の下に (14) 式を解く。

- (4. 1) 空乏層容量 C

$$C = \frac{K}{n+2} \sqrt{\frac{(n+2) K (V + \phi_0)}{q N_0}} \quad [\text{F/M}^2] \quad \dots\dots\dots (15)$$

単位面積の容量を小さくするためには $n > -2$ では誘電率 K および定数 N_0 を小さくし、電圧 V を大きくするべきである。

- (4. 2) 容量変化率 γ

$$\gamma = \frac{\partial C / \partial V}{C} = -\frac{1}{(n+2)} \frac{1}{(\phi_0 + V)} \quad \dots\dots\dots (16)$$

電圧 V 及び定数 n が小さいほど γ は大となる, $n \rightarrow -2$ の時は γ 非常に大となる.

(4. 3) 遮断周波数 fc

$$\left. \begin{aligned} fc &= \frac{\mu}{2\pi(t-d)} \sqrt{\frac{2qN_0(V+\phi_0)}{K}}, & (n=0) \\ fc &= \frac{\mu}{2\pi \ln \frac{t}{d}} \sqrt[3]{\frac{3q^2N_0^2(V+\phi_0)}{K^2}}, & (n=1) \\ fc &= \frac{\mu}{2\pi \left[\frac{-1}{(n-1)x_{n-1}} \right]_d^t} \sqrt[n+2]{\frac{(n+2)(qN_0)^{n+1}(V+\phi_0)}{K^{n+1}}}, & (n \neq 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (17)$$

fc は面積には関係せず $n > -2$ では定数 N_0 易動度 μ , 電圧 V は大きい方が良く, 又誘電率 K 及び半導体母材の厚さ $(t-d)$ は小さい方が大きな fc を与える. $(t-d)$ を小さくしても他のファクタを悪くしないのでこれを小さくする努力がなされている. 材料では μ/K の大きなものほど良い.

(4. 4) Figure-of-Merit, F_γ

$$\left. \begin{aligned} F_\gamma &= fc \cdot \gamma = \frac{\mu}{4\pi(t-d)} \sqrt{\frac{2qN_0}{K(V+\phi_0)}}, & (n=0) \\ F_\gamma &= \frac{\mu}{6\pi \ln \frac{t}{d}} \sqrt[3]{\frac{3q^2N_0^2}{K^2(V+\phi_0)^2}}, & (n=1) \\ F_\gamma &= \frac{\mu}{2\pi \left[\frac{-1}{(n-1)x_{n-1}} \right]_d^t} \sqrt[n+2]{\frac{(n+2)(qN_0)^{n+1}}{K^{n+1}(V+\phi_0)^{n+1}}}, & (n \neq 1) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (18)$$

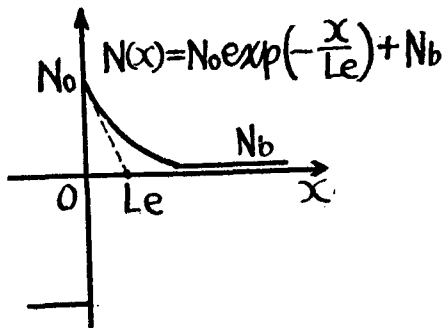
印加電圧が小さい方が F_γ は大となる, 但し電圧が大きくなり空乏層が広がって, $(t-d)$ が零に近づくと fc が急に上るので逆のことが起り得る. 他は fc の条件と同じ時 F_γ の値が大となる.

材料については InSb, InAs が大きな μ/K を与えるがエネルギーギャップが小さいので逆方向電流を小さくしてショット雑音を少くするため冷却を要す. GaAs は次に大きな μ/K を与える. Si と Ge の内では n 型 Ge が良い.

構造について点熔接型と平面接合では点熔接の半径と平面接合のベース層の厚さが等しい時はほぼ等しい遮断周波数を与えることが分った.

第 5 章 超階段型接合の理論解析

前章の解析から定数 n が負の時即ち不純物濃度が原点より遠ざかるに従い減少する様な分布



第 6 図 不純物分布

の時容量変化率が大きいことが期待されるので, 実際に製作可能な分布として指数関数的に減少する場合について解析し, 容量と電圧の関係, 容量の変化率を求める.

不純物分布は第 6 図に示す如くで次式で示すせると仮定する.

$$N(x) = N_0 \exp\left(\frac{-x}{Le}\right) + N_b [M^{-3}] \dots\dots (19)$$

ここに Le は不純物濃度が $1/e$ に減少するまでの距離 $[M]$, N_0 は $x=0$ に於ける不

純物濃度 $[M^{-3}]$, $N(x)$ は x に於ける不純物濃度 $[M^{-3}]$, N_b は拡散前の半導体母材の不純物濃度 $[M^{-3}]$.

ポアソンの方程式に代入して,

$$-\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_0}{K} \exp\left(-\frac{x}{Le}\right) + \frac{qN_b}{K} \quad \dots\dots\dots (20)$$

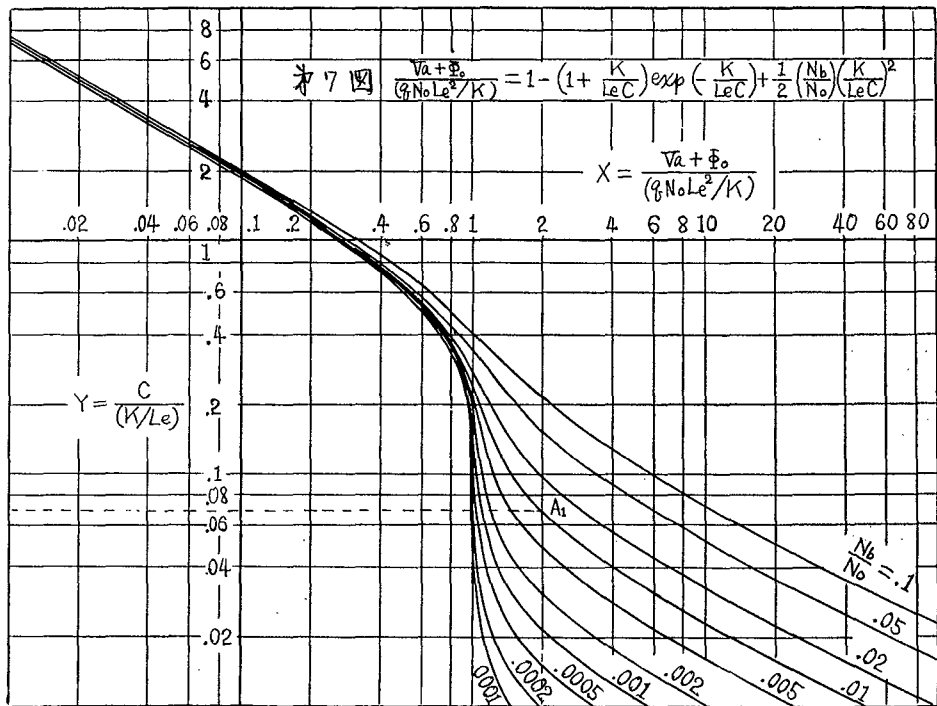
前章と同じ境界条件で (20) 式を解くと, $x=0$ での電界 E_0 は次式で与えられる.

$$E_0 = -\frac{qN_0Le}{K} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{d}{Le}\right) + \frac{N_b}{N_0} \frac{d}{Le} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

電圧と容量の関係は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} \frac{Va + \phi_0}{(qN_0Le^2/K)} = & 1 - \left(1 + \frac{K}{Le \cdot C}\right) \exp\left(-\frac{K}{C \cdot Le}\right) \\ & + \frac{1}{2} \left(\frac{N_b}{N_0}\right) \left(\frac{K}{C \cdot Le}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (22) \end{aligned}$$

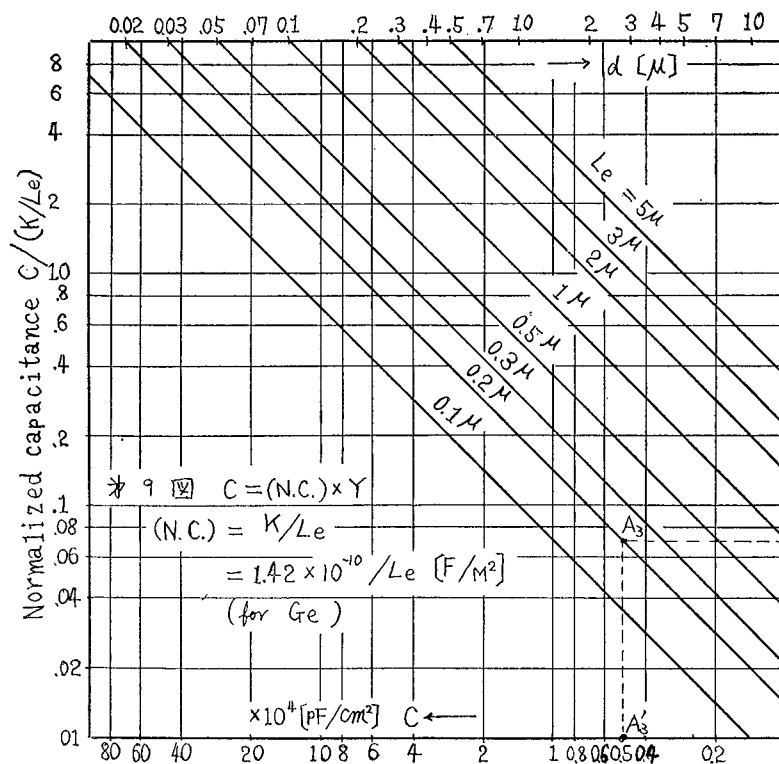
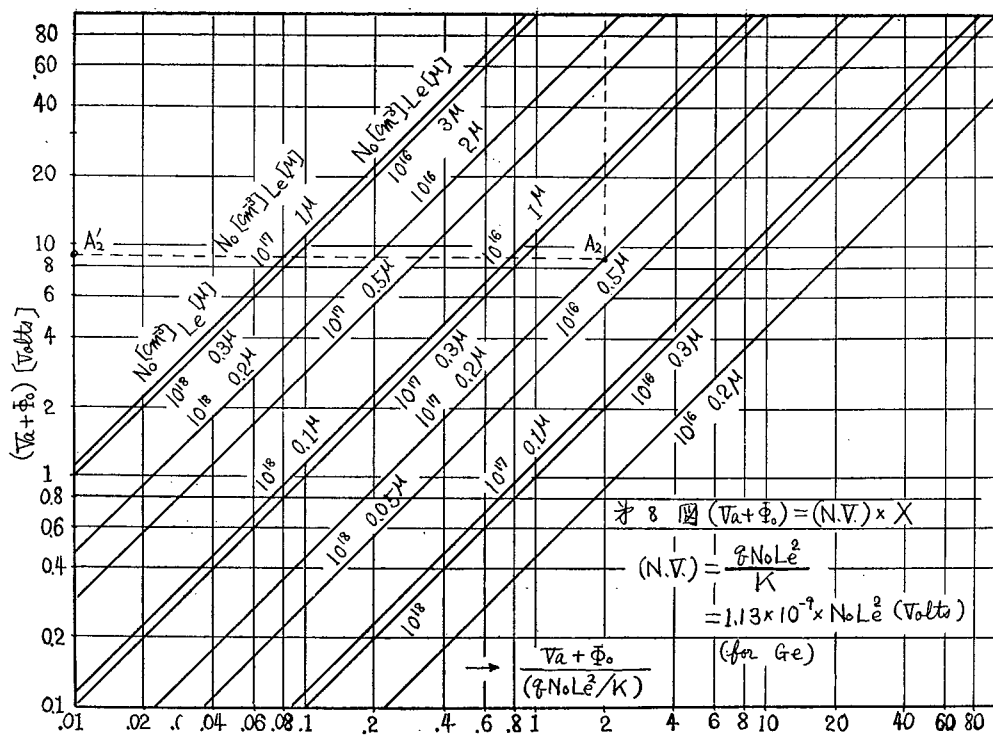
第7図は基準化した電圧 $(Va + \phi_0)/(qN_0Le^2/K)$ と基準化した容量 $C/(K/Le)$ との関係を不純物濃度比 N_b/N_0 をパラメータとしてプロットしたものである. N_b/N_0 の値を小さくすると非常に大きな $\eta = d(\log C)/d(\log V)$ の値が取れる.



階段型と傾斜型接合では $-1/2$ と $-1/3$ で一定である.

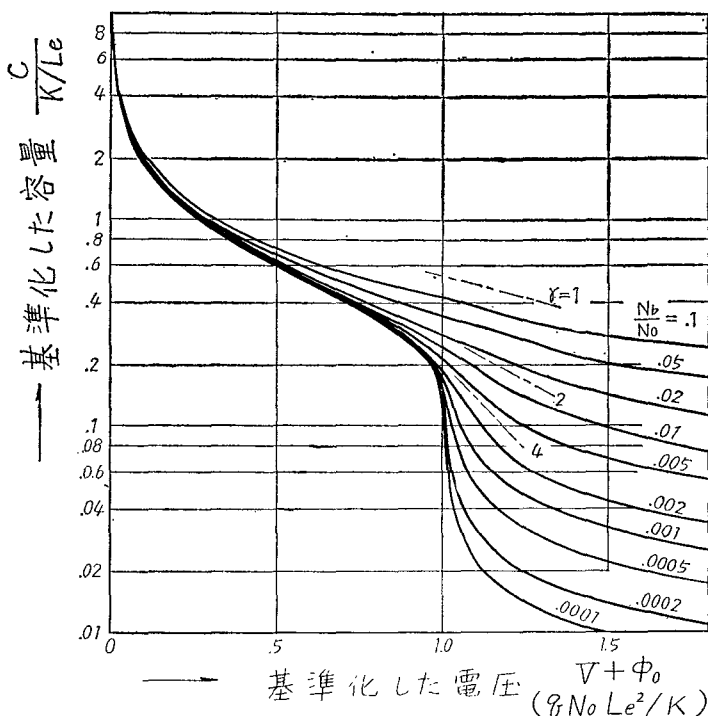
不純物濃度比 N_b/N_0 , 基準化の単位電圧 (qN_0Le^2/K) 及び基準化を容量 (K/Le) が定められるなら, 即ち $x=0$ に於ける不純物濃度 N_0 , 母材の不純物濃度 N_b 及び不純物の拡散長 Le が与えられるならば, 電圧容量特性は完全に定まる. 基準化した電圧と実際の電圧の関係を N_0 及び Le をパラメータとして表したのが第8図である. 基準化した容量と実際の容量との関係を Le をパラメータとして表わしたのが第9図である. これら3つの図面を併用して電圧 $(Va + \phi_0)$ と容量 C の関係が求まる. 本文では一例として $N_0=10^{15}[cm^{-3}]$, $N_b=10^{16}[cm^{-3}]$, $Le=0.2[\mu]$ の場合について特性の求め方を示している.

$$\gamma = \frac{dC/dV}{C} = \frac{d(\ln C)}{dV} = 2.3 \times \frac{d(\log C)}{dV} \quad \dots\dots\dots (23)$$



容量の変化率は上式のように変形出来る。故に電圧に対し容量の対数を取った半対数グラフ上の特性の勾配より γ の値を求めることが出来る。

第10図は(22)式の電圧容量特性の半対数プロットしたものである。実際の容量変化率は10図の曲線の勾配を基準化の単位電圧 (qN_0Le^2/K) で割らねばならない。より大きな容量変化率を得るためには不純物濃度比 N_b/N_0 及び基準化の単位の電圧 (qN_0Le^2/K) は出来るだけ小さくしなければならない。本文では基準化した電圧に対し第10図の曲線の勾配より求めた容量変化率 γ

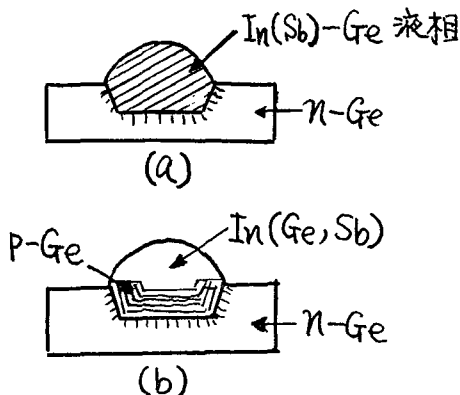


第10図 理論特性の半対数プロット

を N_b/N_0 をパラメータとしてプロットしてある。又パラメータ $Le[\mu]$, $N_0[\text{cm}^{-3}]$ 及び $N_b[\text{cm}^{-3}]$ に対して実際の容量変化率 γ の値を計算しグラフしてある。

第 6 章 超階段型接合ダイオードの設計及び製作

前章 (19) 式及び第 6 図で示した様な不純物分布は合金拡散法で容易に実現出来る。

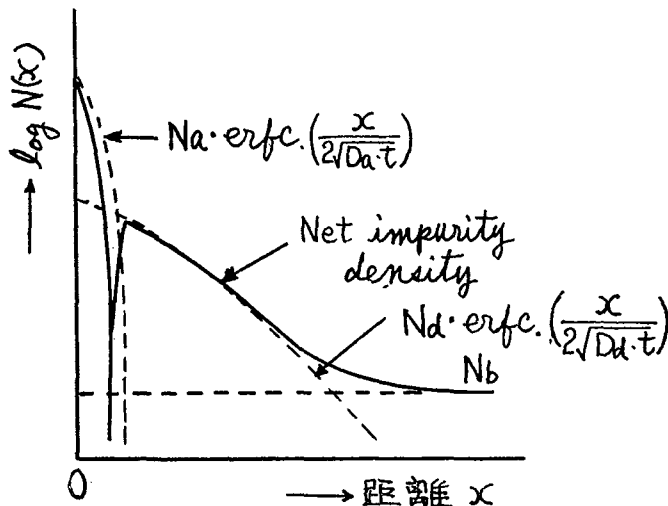


第11図 合金拡散の原理図

第 4 章の材料についての考察から Ge と Si の内では n -Ge を母材に選ぶのが良い。Ge 中では n 型不純物の方が p 型不純物よりずっと拡散係数が大きいのので n -Ge を母材に選んで (19) 式に近い不純物分布を得る。即ち n 型不純物と p 型不純物より構成される合金物質を n 型 Ge の上に高温で合金し (第11図参照) ある程度長時間この温度に保つとドナーとアクセプタ原子が液相と固相の境界より n -Ge 中に同時に拡散して次式の様な不純物分布が得られる。

$$N(x) = N_d \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{D_d \cdot t}}\right) - N_a \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{D_a \cdot t}}\right) + N_b \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここに x は液相と固相の境界からの距離, N_d は固相中 $x=0$ に於けるドナーの濃度, N_a は固相中 $x=0$ に於けるアクセプタ濃度, N_b は拡散前の母材 Ge 中の不純物濃度, D_d はドナー原子の Ge 中での拡散係数, D_a はアクセプタ原子の Ge 中での拡散係数 t は拡散の時間. Ge 中では $D_d \gg D_a$ であるからもし $N_a > N_d$ とすると $p-n$ 接合が $x=0$ (原点) の近くに出来て, 固相 Ge 中の不純物分布は第12図に示す様になる. この分布は第6図の指数関数的に濃度が減少する分布に近似出来る. 固相 Ge 中 $x=0$ のドナー濃度 N_d とアクセプタ濃度 N_a は



第12図 不純物分布

これら元素の液相中の濃度と保持温度に於ける 偏析 係数より決定され, (19) 式の N_0 は (24) 式の N_d とほぼ同じである. (19)式の母材の不純物濃度 N_b は(24)式のそれと同じであり, Ge の比抵抗から決められる. (19) 式の不純物の拡散距離 L_e はドナー原子の拡散係数 D_d 及び拡散時間により決定されほぼ $\sqrt{D_d \cdot t}$ で与えられる. かくして (19) 式と (24) 式は関係づき, (19)式の特性を定めるに必要な不純物濃度 N_0 及び N_b と不純物の拡散長 L_e は母材 Ge の比抵抗, 不純物合金中のドナーとアクセプタ元素の原子比, 及び合金拡散の温度及び時間により決定される. 不純物の合金としては蒸気圧, 毒性, 合金性の点から In と Sb の合金を選んだ.

第1表に上記の様にして求めた設計例を示す. 第1列は試料番号であり, 第2列に合金拡散の温度,第3列に拡散を行わせた時間を示す. 第4列は不純物合金中の In と Sb の比を示す. 第5列は用いた母材 Ge の比抵抗を示す. これらのデータから上述の方法で求めた不純物の拡散長 L_e [μ], $x=0$ に於ける不純物濃度 N_0 [cm^{-3}] 及び Ge 母材の不純物濃度 N_b [cm^{-3}] を第6列, 第7列, 第8列に示す. 又第9列, 第10列, 第11列に第7図で特性を定めるに必要な不純物濃度比 N_b/N_0 , 基準化の単位電圧 ($qN_0 L_e^2/K$) 及び基準化の単位容量 (K/L_e) を求めている. Ge に対して基準化の単位電圧は次式で求まる. (M. K. S)

$$\begin{aligned} (N. V) &= \frac{qN_0 L_e^2}{K} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{16 \times 8.85 \times 10^{-12}} N_0 L_e^2 \\ &= 1.13 \times 10^{-9} \times N_0 L_e^2 [\text{Volts}] \quad \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

又基準化の単位容量は次式で求まる.

$$\begin{aligned} (N. C) &= \frac{K}{L_e} = \frac{16 \times 8.85 \times 10^{-12}}{L_e} \\ &= 1.42 \times 10^{-10} \times \frac{1}{L_e} [F/\text{m}^2] \quad \dots\dots\dots (26) \end{aligned}$$

第 1 表 設 計 値

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	試料番号	合金温度 (°C)	拡散時間 (min)	In:Sb比	母材の比抵抗 (Ω-cm)	不純物の拡散長 Le[μ]	$r=0$ に於ける不純物濃度 No[cm ⁻³]	母材の不純物濃度 Nb[cm ⁻³]	不純物濃度比 Nb/No	基準化の単位電界 $qNoLe/K$ [V]	基準化の容量 K/Le [F/M ²]	個数	基準化の単位電界 $qNoLe/K$ (V/m)
1	Z 010	800	22	100:1	1~2	1.14	8.5×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.01~0.02	124	1.25×10^{-4}	10ヶ	—
2	Z 030	800	22	100:1	1~2	1.14	8.5×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.01~0.02	124	1.25×10^{-4}	10ヶ	—
3	Z 050	800	22	100:1	1~2	1.14	8.5×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.01~0.02	124	1.25×10^{-4}	10ヶ	—
4	Z 060	700	20	100:1	1~2	0.29	7.0×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.011~0.023	6.7	4.9×10^{-4}	10ヶ	2.3×10^7
5	Z 070	800	22	100:1	1~2	1.14	8.5×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.01~0.02	124	1.25×10^{-4}	10ヶ	—
6	Z 100	700	20	100:1	1~2	0.29	7.0×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.011~0.023	6.7	4.9×10^{-4}	10ヶ	2.3×10^7
7	1120	700	10	100:1	1~2	0.2	7.0×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.011~0.023	3.1	7.1×10^{-4}	10ヶ	1.6×10^7
8	1180	700	10	100:1	1~2	0.2	7.0×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.011~0.023	3.1	7.1×10^{-4}	10ヶ	1.6×10^7
9	1200	660	25	100:1	1~2	0.175	5.6×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.014~0.028	1.9	8.1×10^{-4}	10ヶ	1.1×10^7
10	1206	660	25	100:1	~10	0.175	5.6×10^{16}	1.5×10^{14}	0.0027	1.9	8.1×10^{-4}	5ヶ	1.1×10^7
11	2040	660	25	100:1	1~2	0.175	5.6×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.014~0.028	1.9	8.1×10^{-4}	5ヶ	1.1×10^7
12	2046	660	25	100:1	~10	0.175	5.6×10^{16}	1.5×10^{14}	0.0027	1.9	8.1×10^{-4}	5ヶ	1.1×10^7
13	2120	660	60	100:1	1~2	0.274	5.6×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{15}$	0.014~0.028	4.8	5.2×10^{-4}	5ヶ	1.73×10^7
14	2126	660	60	100:1	~10	0.274	5.6×10^{16}	1.5×10^{14}	0.0027	4.8	5.2×10^{-4}	5ヶ	1.73×10^7
15	3250	660	25	25:1	~10	0.175	5.6×10^{16}	$1.6 \sim 0.8 \times 10^{14}$	0.014~0.028	1.9	8.1×10^{-4}	10ヶ	1.1×10^7

第 2 表 実 験 結 果

	1	2	3	4	5	6	7	8
	試料番号	不純物濃度 Nb/No	基準化の単位電 [V]	基準化の単位容 [pF]	実測した接合面 面積 [m ²]	単位面積の基準 化単位容量 [F/m ²]	$C\alpha V-\eta$ の η の最大	図面番号
1	Z 012	—	—	—	0.20×10^{-6}	—	1/3~1/2	7.2 図
2	Z 031	—	—	—	0.33×10^{-6}	—	1/2	7.3 図
3	Z 051	—	—	—	0.38×10^{-6}	—	1/3~1/2	7.4 図
4	Z 062	0.02	6.5	160	0.35×10^{-6}	4.6×10^{-4}	3/2	7.5 図
5	Z 071	—	—	—	0.38×10^{-6}	—	>1	7.6 図
6	Z 106	0.05△	7.0	130	0.33×10^{-6}	4.0×10^{-4}	1	7.7 図
7	1125	0.05△	1.3△	200	0.30×10^{-6}	6.7×10^{-4}	3/2	7.8 図
8	1187	0.03	3.0	130	0.38×10^{-6}	3.5×10^{-4} △	3/2	7.9 図
9	1202	0.005	1.7	230	0.28×10^{-6}	8.2×10^{-4}	3	7.10図(a)
10	1203	0.003	2.1	280	0.31×10^{-6}	9.1×10^{-4}	3	7.10図(b)
11	1208	0.02	1.7	320	0.38×10^{-6}	8.4×10^{-4}	3/2	7.11図
12	2041	0.02	3.0△	150	0.20×10^{-6}	7.5×10^{-4}	3/2	7.12図
13	2046	0.005	2.3	210	0.30×10^{-6}	7.0×10^{-4}	3	7.13図(a)
14	2047	0.005	3.6△	130	0.20×10^{-6}	6.5×10^{-4}	3	7.13図(b)
15	2124	0.02	7.0△	92	0.20×10^{-6}	4.5×10^{-4}	3/2	7.14図
16	2125	0.002	6.5	125	0.30×10^{-6}	4.2×10^{-4}	3	7.15図

(21) 式の電界の式の係数を基準化の単位電界とすれば次式で求まる。

$$\begin{aligned}
 (N, E) &= \frac{qNoLe}{K} = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{16 \times 8.85 \times 10^{-13}} NoLe \\
 &= 1.13 \times 10^{-9} \times NoLe [V/m] \quad \dots\dots\dots (27)
 \end{aligned}$$

第13列にこの値を計算してある。

以上の如く超階段型接合ダイオードは設計されるが、製作方法は 6, 2 節に略説してある。(こ

ゝでは略す.)

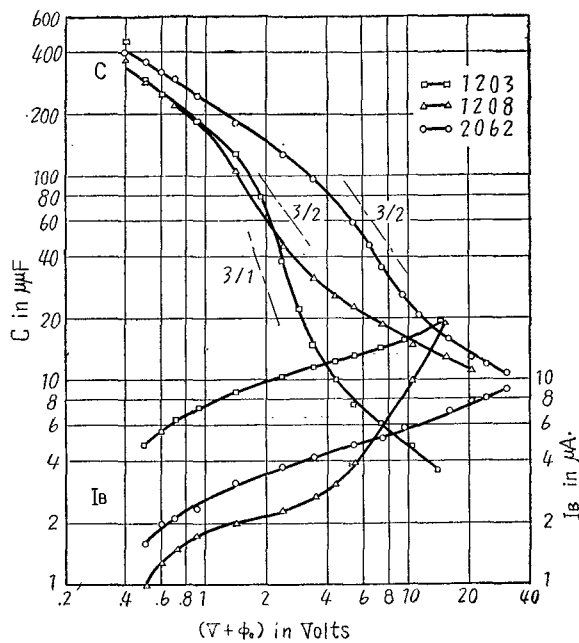
第 7 章 実験結果及び討論

6 章の方法で設計製作したダイオードは次の 2 つに大別される。

- (1) 容量と電圧特性をコントロールする目的の割合大面積のダイオード (7.1 節)
- (2) 高周波用として容量の小さい遮断周波数の高いダイオード (7.2 節)

(7.1) 容量電圧特性

先ず出来上ったダイオードは電圧電流の静特性を取る。逆方向電流の小さい耐圧の高いダイオードは印加電圧を変えて接合容量 C をキャパシタンスブリッジで測定する。1 例を第13図に示す。逆方向電流もプロットしてある。これは 6 章の設計値と 5 章の解析から得られる理論特性と良い一致を示している。特徴あるものとして No. 1203 を取ると $\eta = d(\log C)/d(\log V)$ の値



第 13 図 電圧容量特性

が3にも達し、印加電圧 10 ボルト程度で容量が零バイアスの時のその 1/100 にも減少する。この様な大きな容量の変化は従来の接合では実現不可能である。

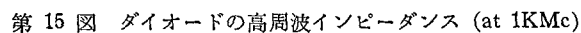
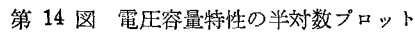
上の測定結果を半対数プロットすると第14図のようになる。5 章で述べた様にこれらの曲線の勾配より容量の変化率 γ が求まる。高い電圧に於いても γ の値は大きく、No. 1203 の試料では 3V まで γ は 1 以上である。1 より大きな γ の値は階段型及び傾斜型接合では逆方向バイアス時はほとんど得られない。 γ の値も 5 章の推定値と良く一致している。

第 5 章第 7 図の電圧一容量の理論特性と第13図の実験曲線を比較することにより、不純物の濃度比 N_b/N_o 、基準化の単位電圧 (qN_oLe^3/K) 及び基準化の単位容量 (K/Le) が求まる。この様にして求めた値を第 2 表に示す。第 1 表の設計値と第 2 表の実験値とはかなり良い一致をしている。第 2 表で設計値からの誤差はほとんど 2 割以内でそれ以上のものには△印をしてある。合金拡散法は不純物分布をコントロールしやすく、再現性に富むと云える。

(7.2) 高周波用ダイオード

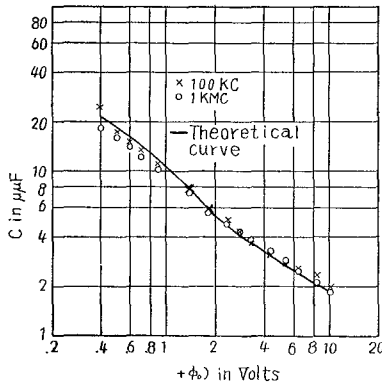
高周波用ダイオードは遮断周波数が十分高くなければならないので直列抵抗 R_s を小さくする様に母材の厚さを出来る限り薄くする様に製作されている。低周波に於ける電圧一容量の関係の

このデータのリアクタンス分より容量を計算して、バイアス電圧に対しプロットすると第16図の○印のようになる。又低周波(100Kc)での測定値をプロットすると×印のようになる。実線は

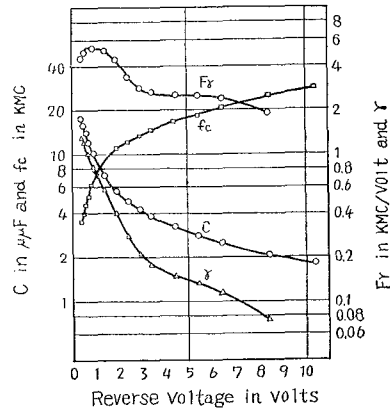


$N_0=3.2 \times 10^{22}[m^{-3}]$, $N_b=3.2 \times 10^{21}[m^{-3}]$, $Le=1.7 \times 10^{-7}[m]$ に対する理論曲線である。低周波での測定値はよくこの曲線と一致するが、高周波 (1KMc) での測定値は低いバイアス電圧に於いて誤差が大きくなっている。

第17図は上の電圧と容量の関係を半対数プロットしたものである。この曲線の勾配より容量変



第16図 電圧と容量の特性
100Kc 及び 1KMc の測定値と理論
特性の比較



第17図 容量 C, 容量変化率 γ , 遮断周
波数 f_c , 及び Figure-of-Merit F_γ と電
圧の関係

化率 γ が求まる。その値もバイアスの関係として示してある。第15図のインピーダンスのリアクタンス分の抵抗分に対する比から遮断周波数が求まるがこれもプロットしてある。遮断周波数 f_c と容量変化率 γ の積が可変容量ダイオードの Figure-of-Merit となるがこの値も計算しバイアスの関数としてプロットしてある。この場合 Figure-of-Merit, F_γ の最大値は $-0.8V$ に於いて $5.5KMc/V$ である。遮断周波数は母材の Ge を薄くする技術が低いのであまり高くないが、 $30KMc$ を越えている。上の Figure-of-Merit を他種ダイオードと比較するとほぼ同程度の大きさとなっている。ジェットエッチング法等によりベース層の厚さを薄くすることによりもっと特性が向上することが期待出来る。

第 8 章 結 論

パラメトリック増巾器用可変容量半導体ダイオードの Figure-of-Merit を利得帯域巾積及び雑音指数の考察よりダイオードの遮断周波数 f_c と容量変化率 γ との積で示すのが良いことを提案した。

非常に一般的なダイオードの不純物分布に対し、遮断周波数 f_c , 容量変化率 γ , Figure-of-Merit, F_γ 等の式を導き、どのような不純物分布、その他の条件に対してこの値が大きくなるかを推定している。この推定より不純物濃度が $p-n$ の境界より遠ざかるに従い減少する様な分布が容量の変化を大きく与えることが解り容易に実現出来る分布として指数函数的に濃度の減少する場合について電圧と容量、容量変化率の関係を求めた、次にこの様な分布は合金拡散法で容易に実現出来ることを示し設計理論をたて実験的にこれを実証している。容量が電圧の -3 乗に比例して変化し数ボルトの電圧で容量の変化比が 100 にも及ぶものが出来た。これは従来の方法では不可能な大きな値である。遮断周波数は $30KMc$ 程度だが Figure-of-Merit F_γ は $5.5KMc/V$ で、従来のものと同程度である。ベース層を薄くするとこの値は更に向上出来る。合金拡散法の利点は不純物分布が容易にコントロール出来て、再現性に富むことである。

このダイオードは、パラメトリック増巾器のみならず電子同調, FM, AFC, 高調波低調波の発生器等の用途がある。

—以上—

審 査 結 果 要 旨

最近の通信技術の進歩はますます広帯域の低雑音の増幅器を要求している。このため、いろいろな電子装置についてこの目的に沿った開発的な研究がさかんに行なわれているが、その中の重要な問題の一つに半導体装置を使用したパラメトリック増幅器がある。

著者は新しい高周波用半導体装置の開発という観点から半導体装置の研究に着手し、上記の事情を考慮して可変容量ダイオードを中心として研究を展開し、その基礎的な解析からはじめて、容量の変化率を大きくするためには超階段型接合がよいことを見出し、その詳細を解析して設計論を確立した。

ついで、この設計論に基づいて試作されたダイオードについて実験的検討を試み、解析結果の正しいこと、ひいては著者の企図したところが正しかったことを立証した。これらが本論文の本文8章にまとめられている。

著者はさらに分布定数型可変容量ダイオードとエサキダイオードを分布定数型に構成した場合とについて研究している。これらは付録の6章にまとめられている。

第1章は総論である。第2章は可変容量ダイオードの研究の歴史的概観とパラメトリック増幅器の原理の概説である。

第3章に入り、可変容量ダイオードの諸量について解説し、これらに対して実用面から要求される事項を明らかにし、問題の所在点を示している。

第4章では不純物分布の形と障壁容量、遮断周波数等の関係を解析で求めている。この解析は不純物分布が一次元分布で距離の n 乗に比例して変化するという仮定のもとではあるがかなり一般的に取り扱っているという意味で新しい知見を加えている。

第5章では前章の解析で n が負のときに容量の変化率が大きいことを知ったので、このような分布に近い実現可能な超階段型接合をとりあげて解析しているが、解析結果は数値計算を行なつて設計に必要な設計図表として与えられており、半導体工業にとっては重要な資料である。

第6章ではこの設計図表に基づいて設計されたダイオードを製作する場合の問題点を論じている。まずはじめに問題になるのは超階段型接合を製作する技術である。

ゲルマニウム中では n 型不純物の方が p 型不純物よりもはるかに拡散係数が大きい点に注目して、 n 型のゲルマニウムを母体として、これに n 型不純物と p 型不純物の合金物質を合金させると、所定の不純物分布が得られることを明らかにしているが、これは技術的に注目し値する。

第7章は実験結果と討論を述べたものである。実測値は設計値とかなりよい一致を示している。

第8章は結論である。

付録に入り、第9章は分布定数型にした可変容量ダイオードの解析、第10～14章はエサキダイオード増幅器の解析と実験結果をそれぞれ述べたものである。

これを要するに本論文はパラメトリック増幅器用の可変容量ダイオードに関する研究結果をまとめたもので、理論的解析によつて新しい知見を加え、接合製造技術に新しい手法を提案するなど、電子工学特に半導体工学に寄与するところが少なくない。

よつて、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。